

UGO GALVANETTO - MIRCO ZACCARIOTTO

IL PROBLEMA DELLA PROPAGAZIONE DELLE CRICCHE IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE*

1. Introduzione

Il progresso tecnico-scientifico sembra inarrestabile e ci presenta continuamente delle realizzazioni che fino a ieri sembravano impensabili: l'altezza degli edifici pare ormai illimitata e si avvicina sempre più al chilometro (fig. 1), i viaggi interplanetari con equipaggio umano sono un progetto la cui realizzazione è sempre più vicina, gli aerei ipersonici capaci di collegare New York con Londra in 30 minuti sono considerati «inevitabili» [1] (fig. 2), e se le api si estinguono, nuove api-robot le sostituiranno per impollinare i fiori [2]. Si fa spazio in noi l'idea che nulla possa sfuggire alla descrizione scientifica e alla successiva applicazione tecnico-ingegneristica. La realtà è più complessa. Esistono infatti fenomeni, anche molto comuni, che eludono



Figura 1. Il Burj Khalifa è il più alto grattacielo al mondo: 828 metri.

Figura 2. Il velivolo senza equipaggio più veloce, NASA X-43°.

* Rielaborazione della comunicazione letta il 26 febbraio 2015 nell'Odeo Olimpico.

una completa comprensione degli scienziati, uno di questi è la rottura degli oggetti. Non bisogna stupirsi se problemi complessi come il calcolo della traiettoria della sonda Rosetta, che ha raggiunto dopo un tragitto di miliardi di chilometri la cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, sono stati completamente risolti, mentre fenomeni apparentemente più semplici, quali lo strappare un foglio di carta o la frammentazione di un bicchiere che cada da un tavolo, sfuggono ad una descrizione accurata. La presente memoria ha lo scopo di considerare alcuni fenomeni di rottura che interessano strutture aerospaziali ed i metodi che possono essere utilizzati per descriverli e prevederli.

2. Fenomeni di rottura in strutture aerospaziali

Una struttura è un qualunque oggetto o dispositivo atto a sopportare o trasmettere forze: per esempio le strutture di un edificio, i pilastri e le travi, trasmettono al suolo il peso delle pareti, dei pavimenti, dei mobili e delle persone che occupano l'edificio stesso. Le strutture di un aereo sopportano i pesi del contenuto dell'aereo e le forze aerodinamiche ad esso applicate in modo da garantire la sicurezza del trasporto...

L'ingegneria strutturale è il ramo dell'ingegneria che si occupa dello sviluppo di nuovi tipi di strutture e della loro progettazione. In particolare la progettazione di una struttura deve garantire che, date le sollecitazioni cui la struttura è sottoposta, questa sia sufficientemente resistente, cioè non si rompa, e sufficientemente rigida, cioè non si deformi eccessivamente.

La rottura di una struttura (collasso strutturale) può comportare notevoli danni economici e anche la perdita di vite umane. Per questo motivo per secoli gli ingegneri strutturali si sono preoccupati di progettare e realizzare strutture che non si rompessero in esercizio. Il fenomeno della rottura, spesso ancora oggi, è semplicemente considerato come qualcosa da evitare e quindi non è preso in considerazione, non è progettato. Questo in parte perché il collasso strutturale è un fenomeno complesso, a volte avviene in modo improvviso, soprattutto in presenza di sollecitazioni eccezionali come possono essere i terremoti per gli edifici civili, o l'impatto con una meteorite per un satellite artificiale; più spesso è invece un fenomeno che presenta una certa gradualità e si prolunga per un considerevole lasso di tempo fornendo tutta una serie di segni premonitori che, se opportunamente identificati, possono mettere a disposizione degli ingegneri informazioni di vitale importanza per riparare la struttura prima che sia troppo tardi.

In tempi recenti considerazioni di tipo economico e di rispetto ambientale hanno fatto sì che, soprattutto in ambito aeronautico, si diffondesse l'idea che fosse inevitabile tollerare la presenza di danneggiamenti limitati nelle strutture. La pretesa infatti di avere delle strutture completamente integre comporterebbe strutture molto pesanti che richiederebbero un più intenso sfruttamento delle risorse naturali per la loro realizzazione e maggiori, inaccettabili, consumi di carburante durante il volo. Negli aerei attualmente in uso è quindi della massima importanza controllare periodicamente lo sviluppo del danneggiamento strutturale in modo da intervenire prima che questo metta a repentaglio la sicurezza del velivolo. Le ispezioni delle strutture aeronautiche comportano dei costi molto elevati perché richiedono che il velivolo sia temporaneamente tolto dal servizio. È quindi auspicabile essere in grado di prevedere l'evoluzione nel tempo delle piccole cricche, di pochi mm come quella della figura 3, che sono inevitabilmente presenti nelle strutture aeronautiche, per ridurre la necessità di effettuare ispezioni e quindi di tenere l'aereo a terra riducendone l'efficienza economica.

In ambito spaziale è molto importante il problema della frammentazione dei satelliti artificiali. La figura 4 mostra un'immagine dei detriti spaziali che orbitano attorno alla terra; le dimensioni dei detriti nella figura sono chiaramente esagerate. Dall'inizio dell'era spaziale sono stati lanciati più di 4000 veicoli spaziali. La grande maggioranza di questi orbita attorno alla terra, ha terminato la sua vita utile e costituisce quelli che si chiamano detriti spaziali: oggetti di dimensioni variabili fra i molti metri e i millimetri, che hanno terminato la loro vita utile. Questi detriti si muovono, rispetto ai "vicini" satelliti funzionanti, con velocità relativa di chilometri al secondo e costituiscono quindi un grave pericolo per i satelliti che verrebbero seriamente danneggiati da una collisione a tali velocità. Se un detrito spa-

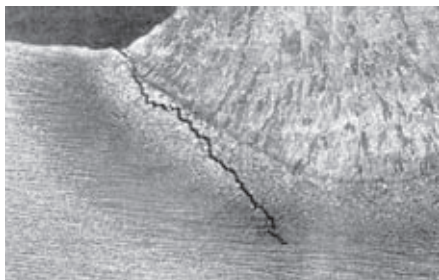


Figura 3. Cricche da idrogeno, da raffreddamento, in metalli.

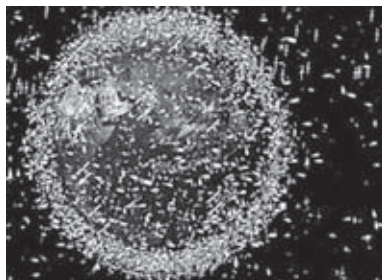


Figura 4. Detriti spaziali in orbita attorno alla terra.

ziale si scontrasse con la stazione spaziale internazionale potrebbe mettere a rischio la vita dell'equipaggio. Si calcola che un detrito "piccolo", di 10 cm di diametro, può distruggere un satellite, mentre un detrito di alcuni millimetri potrebbe comprometterne il normale funzionamento. Si tenga presente che l'energia dell'impatto in tali casi può essere stimata a partire dall'energia cinetica dell'oggetto, proporzionale al quadrato della velocità espressa in m/s.

Gli impatti di satelliti con detriti sono dannosi non solo per il satellite colpito, ma anche per il fatto che ogni impatto genera un gran numero di ulteriori frammenti che a loro volta aumentano la probabilità di altri impatti (sindrome di Kessler). Si ritiene che, se non si prenderanno provvedimenti al riguardo, la probabilità di impatto distruttivo diventerebbe così alta da rendere non economicamente conveniente mettere in orbita altri satelliti (con danni facilmente immaginabili alle telecomunicazioni, alle comunicazioni telefoniche, gps...). Per valutare adeguatamente le conseguenze di un impatto è importante conoscere come si frantumerebbe un satellite colpito da un detrito, quanti frammenti si genererebbero, le loro dimensioni, le relative velocità e direzioni di movimento dopo l'impatto.

Abbiamo così indicato due problemi, di grande rilevanza ingegneristica, la lenta propagazione di cricche in strutture aeronautiche e la frammentazione improvvisa di un satellite per un impatto iper-veloce, che richiedono una capacità non ancora disponibile: quella di descrivere precisamente come un materiale si frattura, sia esso sottoposto a carichi lentamente crescenti, o ripetuti ciclicamente, o impulsivi. La complessità dei fenomeni da studiare è tale che si rende necessario l'utilizzo di strumenti di calcolo automatico: si generano dei modelli delle strutture allo studio e li si testa virtualmente, non cioè nella realtà ma in un ambiente di simulazione al calcolatore. La prossima sezione sarà dedicata appunto a una descrizione, per non addetti ai lavori, di due metodi, fra i tanti, che possono essere adottati per lo studio di problemi strutturali.

3. Modellazione

Il comportamento strutturale dei materiali e dei corpi è studiato da una branca classica della scienza, chiamata solitamente Meccanica Strutturale (Structural Mechanics) o, con nome più caro alla tradizione italiana, Scienza delle costruzioni. Quando si studiano o si progettano le strutture nell'ambito della Scienza delle costruzioni, si abbandona una descrizione discreta della materia, come quella che si

basa sui modelli di atomo e molecola, tipica della fisica, e si adotta il modello di “continuo materiale”. Si ipotizza cioè che il materiale esista come un continuo, la materia del corpo è distribuita con continuità e “riempie” completamente la regione di spazio occupata dal corpo. Il corpo può deformarsi, sotto l’azione di forze o variazioni di temperatura, così da variare le proprie dimensioni o la propria forma. Nel modello usualmente adottato i parametri fondamentali per descrivere il comportamento di un materiale sono la deformazione e la tensione. La tensione rappresenta le forze che i punti del corpo si scambiano tra loro e si genera per il contatto tra i punti in modo che le interazioni esistano solo tra punti infinitamente vicini, cioè fra punti che si “toccano”. Questa teoria è detta “locale”.

La deformazione indica come un corpo cambi dimensione e forma ed è definita come la variazione di dimensione rispetto alla dimensione iniziale, cioè come variazione relativa: se una barra di metallo è inizialmente lunga un metro e sotto l’azione di una forza si allunga ad un metro e 2 millimetri, è caratterizzata da una deformazione dello 0.2%. Se, sotto l’azione di una forza la barra si rompe in due pezzi, non ha più senso parlare di deformazione della barra stessa. Questo esempio, in realtà un po’ semplicistico, dovrebbe trasmettere l’idea che la meccanica del continuo classica riesce a descrivere adeguatamente il comportamento dei corpi, finché sono integri (cioè continui), ma non più quando sono presenti delle cricche (discontinuità). Non si riesce a definire lo stato di deformazione e di tensione di un materiale dove questo si rompe e si generano quindi delle discontinuità.

Per superare tale deficienza della teoria locale classica sono state proposte altre teorie, dette non-locali, che immaginano che i punti di un corpo non scambino forze solo con quelli con cui sono in contatto diretto, ma che le interazioni fra punti avvengano all’interno di un certo raggio di azione. In particolare la teoria della peridinamica [3] prevede che un punto materiale interagisca con tutti i punti che distano da esso meno di un determinato orizzonte. Se una parte di volume interna all’orizzonte diventa vuota per il propagarsi di una cricca, come si vede in figura 5, il punto materiale vede ridotto il volume dei punti con cui interagisce, ma ciò non costituisce una violazione dei principi alla base dei fenomeni descritti. In altri termini alcune teorie non-locali, fra cui la peridinamica, non presuppongono per ogni condizione di carico la continuità del materiale e forniscono una descrizione adeguata del comportamento strutturale sia che il materiale sia integro, sia che esso sia attraversato da cricche.

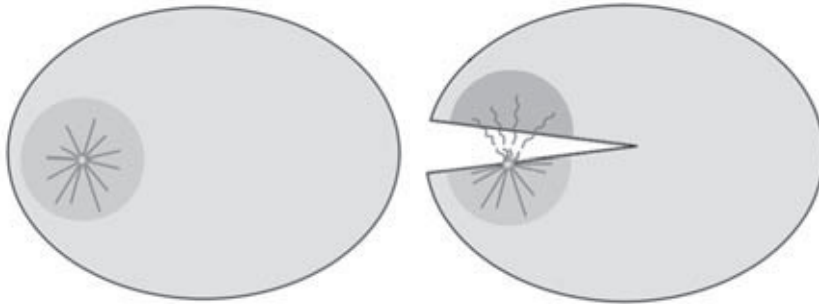


Figura 5. A sinistra, nel corpo integro un punto interagisce con tutti i punti all'interno dell'orizzonte; a destra, nel corpo danneggiato, lo stesso punto interagisce solo con una porzione dell'orizzonte originale. Dei legami prima presenti si sono rotti, ma questo non viola alcun principio matematico alla base della teoria non-locale.

4. Esempi di calcolo

In questa sezione si mostreranno degli esempi di applicazione di metodi di calcolo basati su teorie non-locali. La teoria della peridinamica, menzionata più sopra, permette di prevedere l'innescò della frattura, la sua direzione di propagazione, i punti dove la frattura si biforca e quelli dove si arresta, senza dover definire per ogni cambiamento di condizione dinamica (innescò, biforcazione, deviazione, arresto...) alcun criterio ad hoc: tutti tali fenomeni sono descritti "spontaneamente" dalla teoria che contiene in sé la possibilità di frattura del materiale, diversamente dalla teoria locale che cessa di essere definita non appena il materiale raggiunge le condizioni di rottura.

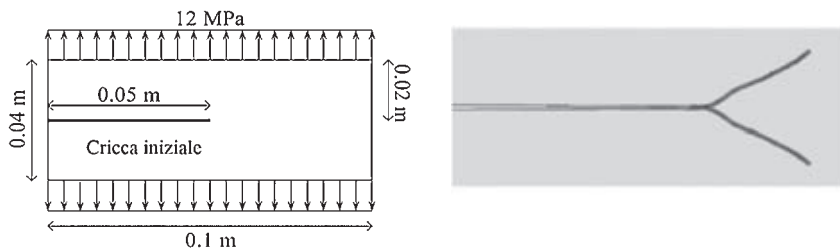


Figura 6. Biforcazione di una cricca.

La figura 6 mostra una lastra soggetta ad una tensione di trazione di 12 MPa che la rompe. Al momento in cui la tensione è applicata è già presente una cricca, disposta lungo l'asse di simmetria orizzontale della lastra. Sotto l'azione della tensione la cricca inizia a propagarsi verso destra e per un breve intervallo di tempo si assiste solo all'allungamento della cricca. Senza apparente spiegazione ad un certo punto dall'unica cricca iniziale si dipartono due cricche che si propagano con un certo angolo di inclinazione, disposte simmetricamente rispetto alla cricca iniziale. Tale fenomeno, biforcazione di una cricca, è descritto dalla teoria della peridinamica in modo semplice, superando molti problemi tipici delle teorie del continuo classiche, e rappresenta fedelmente la fisica del problema [4].

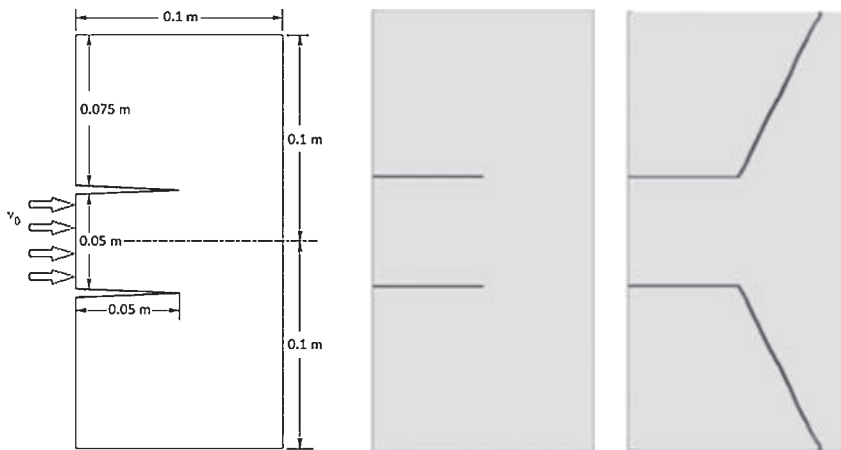


Figura 7. Propagazione di cricche nella piastra di Kalthoff [5].

L'esempio della piastra di Kalthoff [5] è noto in letteratura come benchmark per valutare la bontà dei metodi di calcolo automatico. Una piastra con due intagli è colpita da un impatto proprio nella zona fra gli intagli, come mostrato in figura 7, dove le frecce con la scritta v_0 rappresentano l'impatto. A seguito dell'impatto le cricche si propagano a partire dagli apici degli intagli. Il metodo di calcolo basato sulla teoria peridinamica riesce a simulare bene sia l'angolo di propagazione delle cricche, sia il fatto che non ci sono altre zone della piastra che si danneggiano.

La teoria nonlocale della peridinamica descrive con facilità la propagazione delle cricche, ma è "pesante", richiede cioè tempi di cal-

colo più lunghi delle teorie locali usuali. Questa “pesantezza” è dovuta al fatto che ogni punto materiale in peridinamica interagisce con molti altri punti e non solo con quelli che “tocca”, come avviene invece nelle teorie locali. Per questo motivo è molto utile sviluppare un metodo di calcolo che accoppia le due teorie, quella peridinamica non-locale, applicata dove si propagano delle cricche, e quella classica locale, che si utilizza dove il materiale conserva la propria integrità [6], si veda in proposito la figura 8.

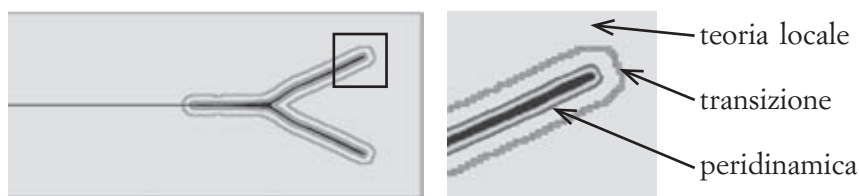


Figura 8. Biforcazione di una cricca ottenuta con un modello matematico accoppiato. La zona racchiusa da un quadrato nella figura di sinistra è mostrata ingrandita in quella di destra.

5. Conclusioni

Il lettore potrebbe essere sorpreso dalla semplicità degli esempi presentati nella sezione precedente e dal fatto che essi rappresentino un vertice dell’attuale ricerca nel campo dell’ingegneria strutturale. In effetti le strutture realizzate sinora dagli esseri umani sono state in grado di percorrere distanze enormi nello spazio o sotto i mari, sopportando temperature altissime o prossime allo zero assoluto, e pressioni enormi, per esempio nei batiscafi che scendono sul fondo delle fosse oceaniche. Tutto questo è stato realizzato senza essere capaci di simulare il semplice infrangersi di un bicchiere? Ebbene sì. In molte applicazioni ingegneristiche le fratture non avvengono, o se avvengono sono di dimensioni così limitate da poter essere trascurate. Tuttavia il bisogno di utilizzare in modo sempre più efficiente i materiali fa sì che d’ora in avanti, con maggiore frequenza, si manterranno in uso anche strutture danneggiate, ma ancora in condizioni di svolgere adeguatamente il proprio ruolo. Per questo motivo la capacità di descrivere accuratamente i fenomeni di rottura sta acquisendo una crescente importanza in Meccanica delle strutture.

Bibliografia

- [1] <http://www.sciencealert.com/top-aerospace-officials-just-called-hypersonic-planes-inevitable>, 24/02/2017.
- [2] http://content.time.com/time/video/player/0,32068,2591571063001_2149180,00.html, 24/02/2017.
- [3] S.A. Silling, "Reformulation of elasticity theory for discontinuities", *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 48, pp. 175-209, 2000.
- [4] F. Bobaru and G. Zhang, "Why do cracks branch? A peridynamic investigation of dynamic brittle fracture", *Int. J. Fract.*, vol. 196, no. 1, pp. 59-98, 2015.
- [5] J.F. Kalthoff, "Modes of dynamic shear failure in solids", *Int. J. Fract.*, vol. 101, pp. 1-31, 2000.
- [6] U. Galvanetto, T. Mudric, A. Shojaei, and M. Zaccariotto, "An effective way to couple FEM meshes and Peridynamics grids for the solution of static equilibrium problems", *Mech. Res. Comm.*, vol. 76, pp. 41-47, 2016.

